局所発汗量と蒸汗量の同時測定と
局所蒸発熱伝達率の算出法MEASUREMENTS OF LOCAL SWEAT RATES AND EVAPORATION RATES
AND THE DIRECT DETERMINATION OF LOCAL EVAPORATIVE HEAT
TRANSFER COEFFICIENTS

垣 鐸 直*, 勝 浦 哲 夫**

Naoshi KAKITSUBA and Tetsuo KATSUURA

Local calorimetry was studied using a device to measure local evaporation rates ($\dot{m}_{sk}$) and a ventilated capsule to measure local sweat rates ($\dot{m}_{sw}$). Changes in $\dot{m}_{sw}$ and $\dot{m}_{sk}$ at chest, forearm and front thigh were observed while two young male subjects were exposed to the heat (46-48°C) for 1 hour. During the first 30-40 minutes, $\dot{m}_{sk}$ increased progressively with $\dot{m}_{sw}$ and became appreciably less than $\dot{m}_{sw}$ when the skin was fully wetted. Thus, the critical $\dot{m}_{sk}$ value can be clearly defined so as to determine local evaporative heat transfer coefficients.

keywords: sweat evaporation, convection, sweating, evaporative heat transfer coefficient
蒸汗、対流、発汗、蒸発熱伝達率

1. はじめに

局所蒸汗量に関する研究は、近年の小型電気式湿度センサの開発に負うところが大きい。先駆的な研究としては Lamke らの研究^{1), 2)}が挙げられる。研究成果をもとに開発された測定器は、現在では市販され臨床や研究に広く利用されている。測定原理は皮膚面近傍の2点の相対湿度と温度を測定し、2点間の絶対湿度勾配から蒸汗量を求める方法で、勾配法と呼ばれている。しかし、有風時の水蒸気濃度勾配は皮膚面からの距離の高次関数となることが知られているが、それを直線で近似するために蒸汗量を過小評価する欠点が指摘されている³⁾。

勾配法の欠点を解消するために、筆者らは境界層内の3点の相対湿度と温度を測定できる測定器(局所カロリメータと呼称)を開発した⁴⁾。水蒸気濃度勾配と温度勾配を皮膚面からの距離の二次関数に近似できるので、理論上は蒸発量や対流による放受熱量の真値に近い値が求められる。さらに、実験式から皮膚面の絶対湿度や皮膚温度も間接的に測定できる特徴がある。既に、試作器を用いた実験的研究により測定器の信頼性を確かめている。

局所発汗量に関する研究も応答の速い電気式湿度センサの開発に負うところが大きい。皮膚に密着した小型のカプセルに一定流量の乾燥ガスを流し、回収したガスの温度と相対湿度を測定することで発汗量を求める方法が一般的である。この測定方法により数多くの研究成果が得られている^{5), 6), 7)}。しかし、局所の発汗量と蒸汗量を同時に測定した研究は見当たらない。そこで、被検者を暑熱環境に曝露した時の局所発汗量と蒸汗量を同時測定し、無効発汗の発現を確認した。また、皮膚面が完全にぬれた状態を直接確認することにより局所蒸発熱伝達率を算出したのでここに報告する。

2. 局所蒸汗量及び対流放受熱量の測定原理

局所カロリメータ(詳細は文献4参照)の測定原理を簡単に説明する。感知部は図1に示す構造で、保護枠内に3個の小型相対湿度センサを組み込み、感湿面を皮膚面に垂直にし、その中心が5、8、11mmなるように配置してある。さらに、各湿度センサ中央部近傍に温度セ

* 豊田工業高等専門学校建築学科 助教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Toyota College of Technology, Dr. Eng.

** 千葉大学工学部工業意匠学科 助教授・理博

Assoc. Prof., Dept. of Ergonomics, Faculty of Engineering, Chiba Univ., Ph.D

ンサ配置して各点の絶対湿度が求められる構造とした。使用したセンサは、測定範囲0～100%、精度±2%、時定数1秒(90%応答)の相対湿度センサ(HM15041、ハイト社)と、測定範囲-20～80℃、精度±0.2℃、0→100℃に対する時定数1.6秒の白金測温体(Pt100Ω)を使用した。

図2に境界層内の絶対湿度と温度のプロフィールを示す。局所蒸発量($\dot{m}_{sk}$)は次式で定義される。

$$\dot{m}_{sk} = D_w \times (\delta \rho / \delta X) \quad (\text{g/m}^2 \cdot \text{hr}) \quad (1)$$

ここに、 D_w =拡散係数(m^2/hr)

ρ =絶対湿度(g/m^3)

X =表面からの距離(m)

また、局所対流放熱量(q_c)は次式で定義される。

$$q_c = \lambda \times (\delta \theta / \delta X) \quad (\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr}) \quad (2)$$

ここに、 λ =熱伝導率($\text{kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$)

θ =温度($^\circ\text{C}$)

実験式 $\rho(X)$ 、 $\theta(X)$ から、 $\delta \rho / \delta X$ 、 $\delta \theta / \delta X$ が得られるので、上式群から $\dot{m}_{sk}$ と q_c が算出できる。また、 $\rho(X)$ 、 $\theta(X)$ に $X=0$ を代入した値が皮膚面の絶対湿度や皮膚温度に相当することになる。

図1 局所カロリメータ感知部のセンサ配置図

3. 暑熱環境下での実験

3-1. 実験内容及び測定項目

千葉大学工学部工業意匠学科内の人工気候室で実験を行った。健康な男性被検者2名の局所の蒸汗量、発汗量、熱流量、直腸温、皮膚温(Hardy-DuBoisの7点法)を1分間隔で連続測定し、曝露前後の体重減少量、曝露中の無効発汗量も測定した。1回の実験に1人の被検者を対象とし、蒸汗量と発汗量は右胸、右大腿前部中央、右前腕中央を1回に1ヶ所ずつ測定した。従って、被検者1人当たり3回の実験を行った。

発汗量の測定には換気カプセル法を用い、カプセルに流入する乾燥ガス流量を1.0～2.5 l/minの範囲に制御した。カプセルから回収されたガスの相対湿度と温度をデータ集録装置(サ-モダック6、江藤電気)に接続し、GPIBボードを介してパーソナルコンピュータ(NEC-PC9

801)に転送して収録した。局所カロリメータと熱流センサ(Kemtherm HMF-101、京都電子工業)は換気カプセルに隣合う位置に取り付け、データ収録は発汗量の測定と同様にデータ集録装置によるオンラインで行った。直腸温と皮膚温は専用サーミスタを用いた。それらを多点温度集録装置(K923、テクノセブン)に接続し、GPIBボードを介しパーソナルコンピュータで収録した。曝露前後の体重は精密体重計(K-2、神戸スケール社)で測定し、その結果から体重減少量を求めた。また、曝露前後の着衣(トランクスのみ)の重量と床面と体表面の汗を拭き取ったタオルの重量を精密天秤(FA2000、A & D社)で測定し、無効発汗量はそれらの重量差の合計として求めた。

3-2. 実験手順

被検者は27℃前後の前室で30分間滞在し、その後気温48℃、相対湿度50%に制御した人工気候室内に移動した。人工気候室の側壁の内側には銀色の布製カーテンを掛けており、壁面の影響を極少にする工夫をしている。事前観測でグローブ温度計を用いた環境測定を行っており、平均放射温度と気温が等しい条件を満足していることを確かめている。

被検者の着衣状態は裸体(トランクスのみ)で、姿勢は、市販の屋外用リクライニングシート上にて仰臥位とした。但し、背面の接触面積を最小にするために、身体を支持するビニールバンドの幅を細くするなどの改良を加えた。高温曝露なので安全のためにテnderも同時に入室し被検者を観察した。曝露時間は60分を目安としたが、被検者の全身が汗でぬれ十分な無効発汗を確認できるまで継続した。結果的に平均曝露時間は60分であった。

図2 皮膚面上の温度と絶対湿度のプロフィール

3-3. 実験結果

①環境側条件

人工気候室内の温度/相対湿度を48℃/50%に設定したが、実際の温度は1～2℃低く、相対湿度も35～45%前後と低めでの制御となった。室内の風速は0.1～0.2 m/sであった。温度/相対湿度の結果を表1に示す。

②皮膚温及び直腸温の経時変化

一例として、同一被検者の各部皮膚温と直腸温を図3(a)～(c)に示す。前室での皮膚温と直腸温はよく安定しており、平均皮膚温は34.8℃前後、直腸温は37～37.2℃であった。暑熱環境に移動した直後からどの部位の皮膚温も迅速に上昇し、20分経過するまでは上昇傾向はあるが5～10分間でほぼ安定に達した。安定期の皮膚温は体幹部で高く41℃前後であったが、他は38～39℃の範囲であった。直腸温は、全ての実験で暑熱曝露開始時に多少低下する傾向が見られた。これは、低温曝露後に加温を開始した初期時に観察される血管拡張による血流再分配⁹⁾が原因と思われる。20分前後経過してから曝露前の値に戻り、その後は一定の上昇率(1～1.2℃/hr)で上昇した。

図3(a) 暑熱時の直腸温の変化

図3(b) 暑熱時の各部皮膚温の変化

図3(c) 暑熱時の各部皮膚温と平均皮膚温の変化

③局所発汗量と蒸汗量の経時変化

一例として、同一被検者の各部位の局所蒸汗量($\dot{m}_{sk}$)、局所発汗量($\dot{m}_{sw}$)、平均皮膚温(MST)を図4～6に示す。不感蒸泄域での発汗量と蒸汗量は部位による差は余り見られず、発汗量がやや大きい値を示した。暑熱曝露後の発汗量と蒸汗量の上昇率は、部位による差が見られたが、無効発汗が発現するまでは蒸汗量と発汗量の上昇率は近似しており、前腕の上昇率が最も高く、胸部、大腿前部の順に低くなる傾向が見られた。

④熱流量と対流放熱量

図7に大腿前部での測定結果の一例を示す。熱流量の平均値は前室で60 kcal/m²・hr、暑熱曝露で-60 kcal/m²・hrであった。移動後の変化は迅速で直ちに安定する特徴を示した。また、局所カロリーメータで同部位の対流放熱量も算出した結果、±10 kcal/m²・hrの値が得られ、自然対流域では放射による放熱量の20～25%程度となる結果を得た。

⑤蒸発熱伝達率の算出

無効発汗は、胸や大腿で30～40分経過した時点で発現した。図4～6の斜線部は無効発汗を示している。例外なく無効発汗発現後の蒸汗量が減少しており、皮膚面上の汗の層による発汗抑制が働いたものと思われる⁹⁾。

曝露中に発汗量が蒸汗量より多くなった時点が皮膚面が完全にぬれた状態(局所ぬれ率=1.0)と判断できるので、その時の蒸汗量が臨界蒸汗量となる。図4に臨界点と臨界蒸汗量を示した。臨界点での皮膚面と環境の水蒸気圧差を求め局所蒸発熱伝達率を算出した結果を表1に示す。前腕の蒸発熱伝達率($h_{e, kcal/m^2 \cdot hr \cdot mmHg}$)の値が大きく、大腿前部、胸部と順に小さくなる傾向が確かめられた。

曝露中の発汗量と無効発汗量を表2に示す。本実験では発汗量と無効発汗量を連続同時測定していないので、正確に蒸汗効率(発汗量から無効発汗量を減じた値を発

図4 前腕の蒸汗量と発汗量の変化

図6 大腿前部の蒸汗量と発汗量の変化

図5 胸部の蒸汗量と発汗量の変化

図7 熱流量と局所対流放熱量の変化

表1 臨界蒸汗量から求めた局所蒸発熱伝達率

Subject	A			B		
Environ. factors	46.1°C/39.6%	46.2°C/37.5%	46.8°C/35%	45.9°C/40.4%	46.7°C/46.5%	47.5°C/40.5%
Observed site	chest R	fornt thigh R	forearm R	chest R	fornt thigh R	forearm R
Critical evaporation rate (g/m².hr)	154	212	273	169	162	225
Vapor pressure difference (mmHg)	16.8	20.8	17.7	17.2	14.8	19.2
Local evaporative heat transfer coefficient (kcal/m².hr.mmHg)	5.26	5.85	8.83	5.63	6.30	6.72

表2 体重減少量と無効発汗量

Subject	A			B		
Environ. factors	46.1°C/39.6%	46.2°C/37.5%	46.8°C/35%	45.9°C/40.4%	46.7°C/46.5%	47.5°C/40.5%
Observed site	chest R	fornt thigh R	forearm R	chest R	fornt thigh R	forearm R
weight loss $\dot{m}_{sw}$ (g)	390	817	539	196	290	320
Amount of sweat off and on the skin $\dot{m}_{dr}$ (g)	103	508	433	25	116	196
$\dot{m}_{dr}/\dot{m}_{sw}$	0.26	0.62	0.80	0.13	0.40	0.61

汗量で除した値)を求めることはできなかった。そこで、参考として発汗量に対する無効発汗量の割合を比較すると、全ての実験で全身がぬれた状態を確認したにもかかわらずかなりのばらつきが見られた。

4. 考察

局所の熱収支や温冷感は、全身のそれらを取り扱う上でもその重要性が認識されている。例えば、持田¹⁰⁾は局所の対流熱伝達率から全身の対流熱伝達率を求める理論的手法を提案しており、堀越¹¹⁾は局所放射の影響を評価している。本研究では、暑熱時の局所発汗量と蒸汗量を同時に測定することにより蒸汗量の臨界点を直接確認できることと、その条件下で局所蒸発熱伝達率を算出できることを提示した。以下に、関連する問題点について考察する。

4-1. 局所経路別熱収支量を求めるための実験的手法

人体側から見ると熱流量は皮下組織内の伝導による熱量に等しく、環境側から見ると対流と放射による放受熱量の合計(乾性放受熱量)に等しい。全身レベルでの熱収支の場合、両熱伝達率、平均皮膚温と気温の差(放射の場合は平均放射温度との差)が既知であれば経路別に熱収支量を求められるので、放射や対流のそれぞれの影響を実験的に評価できる。局所の場合は、乾性の放受熱量を経路別に求めることが難しかったが、局所カロリメータは境界層内の温度プロフィールも求められるので⁴⁾図7に示したように局所対流放受熱量も求められる。本研究では、主に局所発汗量と蒸汗量の同時測定とその応用について論じているが、熱流計と局所カロリメータによる局所の対流及び放射熱収支量も同時に求められる点も実験手法として意義あるものと思われる。

4-2. 蒸発熱伝達率算出における問題点

熱収支理論に従えば、皮膚面の飽和水蒸気圧(p_{sk}^* , mmHg)、環境の水蒸気圧(p_a , mmHg)、ぬれ率(ω)又は比較湿度(ψ)と蒸発熱伝達率が既知であれば蒸発放

熱量(E_{sk})は次式で算出できる。

$$E_{sk} = h_e \times \omega \times (p_{sk}^* - p_a) \quad (\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr}) \quad (3)$$

または、

$$E_{sk} = h_e \times (\psi \times p_{sk}^* - p_a) \quad (\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr}) \quad (4)$$

皮膚面の水蒸気圧は理論的にはぬれ率などを導入して定義できるが、実際には皮膚面が完全にぬれている状態でない限り既定することはできない。従って、人体の蒸発熱伝達率を求めるためには、皮膚面が完全にぬれていることを確認することが必須条件となる。Nishi¹²⁾は、暑熱時には食道温が急に上昇する臨界点を観察できることを示しており、その現象は無効発汗により熱平衡が維持できなくなったからと解釈した上で、間接的に全身の皮膚面が汗でぬれたことを確認できると報告している。一方、Candas¹³⁾は、暑熱時の発汗量と無効発汗量を同時に測定した結果から、蒸汗効率が0.6以下にならないと皮膚面は完全にぬれた状態とはならないことを確認している。本研究の目的はこれらの手法を再確認することではないが、全身の場合、 $\omega=1.0$ または $\psi=1.0$ の状態を臨界点から判断し、その時点の資料から蒸発熱伝達率を求める実験的手法には問題があること示唆したい。原因は臨界点以後の蒸汗量の抑制である。本実験では、臨界点以後の蒸汗量が臨界点での蒸汗量の60%まで減少したケースがあった。全身の場合、最後の部位が汗でぬれた時点が臨界点であるが、その時点では他の部位で蒸汗量の抑制が生じていることを疑う余地はない。環境と皮膚面の水蒸気圧差は変わらないので、求めた蒸発熱伝達率は過小評価される危険性がある。

4-3. 非定常時の蒸発熱伝達率

強制対流領域では対流熱伝達も蒸発熱伝達も気流速が支配的であるので、気流速が決まれば一意的に両熱伝達率を求めることができる。皮膚面と環境の水蒸気圧差の影響は受け難く、非定常時でもその値が変化する可能性は少ない。しかし、室内環境ではむしろ自然対流領域に属する場合が多い。Kakitsuba¹⁴⁾は、自然対流領域では温度差に加えて水蒸気圧差も物質移動の駆動力

になることを証明している。温湿度条件が一定の暑熱曝露時では、曝露後数分で平均皮膚温は安定する。簡単のために気温と平均皮膚温が36℃を想定すると、初期時は温度差も水蒸気圧差もないので蒸発熱伝達率は最小値となる。しかし、皮膚面の水蒸気圧は、図8に示したように皮膚面が完全にぬれるまで時間と共に比較的緩慢に上昇する。そこで、与えられた条件から等水蒸気圧温度差(iso-vapor pressure temperature difference; ΔT_p)を算出した(算出方法の詳細は文献14を参照)。そして、一般式 $h_e = k \times \Delta T_p^{0.25}$ に $k = 4.5 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg}$ を代入して h_e の値を求めた結果を図8に示す。 $\psi = 1.0$ の時には ΔT_p は6℃を越え、 h_e は $7 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg}$ 以上となる。この様に、非定常時では h_e の値が変化するので非定常での熱収支を取り扱う場合に注意を要する。

図8 非定常時の蒸発熱伝達率

謝辞

今回の実験に協力して頂いた千葉大学工学部院生の李偉房氏、富岡慶氏、田淵竜平氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Lamke, L.O., Nillson, C.E. and Reither, H.L.: Insensible perspiration from the skin under standardized environmental conditions, Linköping Univ. Med. Dissertation, Vol. 48: pp. II13-II21, 1977.
- 2) Lamke, L.O.: An instrument for estimating evaporation from small skin surfaces, Scand. J. Plast. Reconstr. Surg., Vol. 5, pp. 1-7, 1970.1.
- 3) Kakitsuba, N.: Evaporative rate from the skin surface in hyperbaric environments, SHASE Trans., Vol. 19: pp. 59-69, 1982.6.
- 4) Kakitsuba, N. and Katsuura, T.: Development of a new device to measure local heat exchange by evaporation and convection, Aviat. Space Environ. Med., Vol. 63, pp. 538-542, 1992.6.
- 5) Nakayama, T. and Takagi, K.: Minute pattern of human perspiration observed by a continuously recording method, Jpn. J. Physiol., Vol. 9, pp. 359-364, 1959.
- 6) Ohara, K.: Heat tolerance and sweating type, Nagoya Med. J., Vol. 14, pp. 133-144, 1968.
- 7) Ogawa, T.: Local determinants of sweat gland activity, In Advances in Climatic Physiol., pp. 93-108, Igaku-shoin, 1972.
- 8) Webb, P.: Afterdrop of body temperature during rewarming from mild hypothermia in humans, J. Appl. Physiol., Vol. 58, pp. 4-13, 1985.
- 9) Nadel, E.R. and Stolwijk, J.A.J.: Effect of skin wettedness on sweat gland response, J. Appl. Physiol., Vol. 35(5), pp. 689-694, 1973.11.
- 10) 持田徹: 人体に関する対流およびふく射熱伝達率、日本建築学会論文報告集、第258号、pp. 63~69 昭和52年8月
- 11) 堀越哲美 他4名: 非対称および不均一熱放射環境の人体影響評価方法の研究、日本建築学会、第413号、pp. 1~28、平成2年7月
- 12) Nishi, Y., Gonzalez, R.R. and Gagge, A.P.: Direct measurement of clothing heat transfer properties during sensible and insensible heat exchange with the thermal environment, ASHRAE Trans., Vol. 81(2), pp. 183-199, 1975.
- 13) Candas, V., Libert, J.P. and Vogt, J.J.: Human skin wettedness and evaporative efficiency of sweating, J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol., Vol. 46(3), pp. 522-528, 1979.
- 14) Kakitsuba, N. and Bondi, K.R.: Heat transfer from the human body in hyperthermic, low gas-velocity environments, Aviat. Space Environ. Med., Vol. 58, pp. 227-236, 1987.3.

(1994年1月28日原稿受理, 1994年8月25日採用決定)